

상모리패총에서 산출되는 이매패류 패각을 이용한 고환경 복원 예비연구

김정숙¹⁾, 우경식^{1)*}, 홍 완²⁾, 강창화³⁾

¹⁾강원대학교 지질학과, ²⁾한국지질자원연구원 지구환경연구본부, ³⁾제주고고학연구소

Preliminary Study on the Paleoenvironment Reconstruction using a Bivalve from Sangmori Shell Mound

Jeong Suk Kim¹⁾, Kyung Sik Woo^{1)*}, Wan Hong²⁾, Chang Hwa Kang³⁾

¹⁾Department of Geology, Kangwon National University

²⁾Geological & Environmental Hazards Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

³⁾Archaeological Institute of Jeju

요 약 : 이 연구는 제주도 남쪽에 위치한 상모리패총에서 채취한 조개패각(밤색무늬조개과 투박조개, *Glycymeris albolineata*) 시료(JSM-B01)의 산소와 탄소 동위원소 조성을 이용하여 이 조개가 살던 시대의 해양환경을 복원하기 위해 수행하였다. 패각의 지화학적 조성은 서식주변 환경에 대한 정보를 제공한다. 연구 패각인 투박조개의 산소와 탄소 동위원소 조성은, 성장기에는 주변 환경에 관한 정보를 잘 반영하였지만 성장이 거의 멈추는 노년기에는 주변 환경 변화를 거의 반영하지 못 하였다. 투박조개의 성장기(장년기)에 기록된 산소와 탄소 동위원소 조성은 계절적 주기를 잘 반영하고 있는데, 이러한 계절변화는 여름에 일시적으로 나타나는 중국대륙연안수인 저염분수의 영향을 받는 것으로 판단된다. 탄소 동위원소 조성 역시 여름시기에는 저염분수의 영향을 반영하여 낮은 값을 보이고, 겨울시기에는 해수 표층의 식물성 플랑크톤 생산성에 의한 영향을 받아 여름보다 겨울에 상대적으로 높은 값을 보였다. 따라서 투박조개의 산소와 탄소 동위원소 조성의 계절적인 변화패턴을 이용한 고환경 복원 연구는 과거 해수환경을 해석하는데 크게 도움이 될 것으로 사료된다. 그러나 과거 해수환경 변화를 보다 명확하게 해석하기 위해서는 시료를 채취한 지역의 주변 해수환경에 대한 모니터링과 밤색무늬조개과 조개의 생태학적인 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것으로 사료된다.

주요어 : 상모리패총, 이매패류, 안정동위원소, 고환경, 제주도

Abstract : The purpose of this study is to investigate paleoenvironmental conditions of the shallow sea around Jeju Island during the Late Holocene using geochemical contents of the bivalve (*Glycymeris albolineata*) collected from the Sangmori Shell Mound. The bivalve shell used shows the archaeological age of 2,300 yr BP. Stable carbon and oxygen isotope compositions show that growth rates decreased with aging. Coeval trends of both isotope compositions can be observed: heavier values during winters and lighter values summers except for their young and old growth stages. The seasonality of bivalve shell appear to reflect seasonal variations of paleotemperature as well as paleosalinity. Especially China Coastal Water with low salinity was transported into the southern Jeju Strait from Changjiang River during summer periods. Heavier carbon isotope values during winter indicate higher productivity, and this is supported by high density of phytoplanktons and higher chlorophyll contents during winter time. For accurate interpretation, monitoring of present-day conditions of shallow marine water as well as additional

* corresponding author: Kyung Sik Woo, Department of Geology, Kangwon National University, wooks@kangwon.ac.kr

geochemical analysis of the same Recent bivalve may be necessary.

Key Words : Sangmori Shell Mound, bivalve, stable isotope, paleoenvironment, Jeju Island

1. 서론

오늘날 지구는 이상 기온 현상 및 돌발기후변화를 겪고 있다. 이러한 기후변화는 대기 및 해양환경뿐만 아니라 생태계에 많은 변화를 초래한다. 이로 인해 이미 많은 나라에서는 미래의 기후변화를 예측하기 위한 다양한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 특히 많은 지질학자들은 과거 수십 년 동안 후빙기후를 밝히기 위해 여러 가지 시료를 이용하여 과거의 기록을 연구해 왔다. 그 중 대표적인 것으로는 극지방의 빙하, 원양성 퇴적물 또는 호수 퇴적물 등 과거의 기후를 기록하는 퇴적물을 대상으로 한 연구를 들 수 있으며(Bradley, 1999), 최근에는 산호(Beck *et al.*, 1992; Gagnon *et al.*, 2007)를 이용한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 특히 원양성 심해퇴적물을 이용한 연구는 시료 내에 포함되어 있는 유공충을 이용한 연구가 매우 활발하다(Duplessy *et al.*, 1970; Shackleton *et al.*, 1973; Arthur *et al.*, 1983; Caron *et al.*, 2009). 또한 동굴생성물을 이용한 연구도 활발히 진행되고 있다(gnchniet, 2009; Woodhead *et al.*, 2010; Jo *et al.*, 2010). 이러한 시료의 공통점은 오랜 시간동안후외부의 환경 변화 및 기후를 기록하면서 퇴적되거나 성장한다는 점이다. 과거의 기후변화를 추정하는 연구는 각질 내에 포함된 여러 조직적 및 지화학적 지시자의 분석을 통해 그 변화 패턴을 연구함으로써후빙기후 변화를 추적한다. 이러한 빙기후 연구는 방사성탄소연대측정을 비롯한 다양한 연령측정법이 이용되고 있으며 이러한 분석법의 발전으로 고해상도 분석이 가능해지면서 빙기후 연구분야에서 비약적인 발전을 이루게 되었다. 그 결과 탄산염 각질을 만들면서 성장하는 산호나 연체동물들은 분석 해상도에 있

어 짧게는 주주기(week)~공충또는 월주기(month)~공까지 고해상도 분석이 가능해졌다. 조개나 소라와 같은 연체동물은 과거 인류의 식재료로 인식되어 먹고 버렸기 때문에 이들로 이루어진 패총을 유적지 근처에서 쉽게 찾을 수 있다. 이러한 패각은 그 원래 광물성분과 조직이 변질되지 않은 경우가 많아 당시의 해수환경을 잘 반영하므로 홀로세 후기의 변화경 연구에 많이 이용되고 있다.

패총(貝塚)이란 선사시대 인류가 식재료로 채집한 조개를 먹고 난 뒤, 그 껍데기를 대량으로 버린 결과로 만들어졌다. 이때 순수한 패각으로만 이루어진 경우도 있지만 대부분 생활 쓰레기와 함께 쓰레기더미로 많이 발견되기 때문에 석기편, 토기편, 동물뼈와 같은 여러 가지 부수적인 파편들도 많이 포함되어 있다. 패총의 출현은 인류가 조개와 물고기 등의 수산 자원을 적극적으로 이용하기 시작했다는 것을 알려주는 중요한 증거자료가 되며, 이러한 패총은 지금으로부터 약 1만 년 전부터 형성된 것으로 알려져 있다(스즈키, 1989). 특히 패총은 파도가 잔잔하여 패류의 서식지로 알맞은 내만(內灣)이 발달한 지역에서 많이 형성되었는데 주로 유럽의 스페인, 남프랑스, 북해 연안 등지에서 많이 발견된다. 북미 대륙의 동해안 남부와 서해안에도 많은 패총들이 형성되어 있으며, 아시아에서도 중국 대륙 연안, 베트남, 태국, 보르네오 등지에서 대규모의 패총들이 발견된다. 또한 폴리네시아, 멜라네시아, 마이크로네시아 등과 같은 소규모 섬들로 이루어진 지역에서도 많은 패총들이 존재하며 이 지역에는 오늘날까지도 큰 규모의 패총이 형성되고 있다. 한반도에서는 서해와 남해에 주로 패총이 분포하고 있으며, 제주도는 해안가 전반에 걸쳐 많은 패총들이 존재한다. 우리나라의 패총연구는 1907년 일본인 학자 이마니시 류가 최초로 조사

발굴한 김해패총을 시작으로 함북 웅기, 함남 북청, 황해도 몽골포, 경기도 덕적도, 경남 웅천·고성·양산·마산·동래·부산 동삼동, 경기도 용진군 등지에서 패총연구가 이루어져 왔다.

패총은 처음 고고학적인 측면에서 좋은 시료 획득이라는 목적과 함께 조개의 활용정도(식재료, 장신구)와 어떤 종류의 패류를 섭취해 왔는지에 대한 종 분류 및 패총의 크기와 범위에 따른 주거지의 크기 또는 주거지의 지속정도를 파악하는 수단으로 연구되어왔다(스즈키, 1989). 하지만 패류가 방사성탄소연대측정에 좋은 시료로 이용되고, 탄소연대측정이 최근 홀로세 시료의 연대측정에 좋은 방법이라는 사실이 널리 인식되면서 패총을 이루고 있는 여러 패각을 통해 유적지의 절대연령측정이 이루어져왔다. 따라서 문화층에 나타나는 유물을 통한 시대 추정과 함께 패총을 이루는 패류의 탄소연대측정을 통해 보다 정확한 시기를 파악할 수 있게 되었다. 이러한 연구는 지질학적 관점에서도 어느 특정시기의 시료를 채취함으로써 인해 당시 환경을 연구해 볼 수 있는 중요한 자료가 되므로 고고학·지질학적 측면으로 볼 때 패총이 형성된 당시의 환경을 복원 할 수 있는 연구 수단이 된다고 할 수 있다. 이미 전 세계적으로 홀로세에서 현재에 이르기 까지 패총에서 산출되는 탄산염 패각의 성장선을 분석하거나 산소와 탄소 동위원소 성분 및 미량원소 분석을 통해, 패각이 채취되었던 계절 파악, 또는 서식당시의 해수환경을 복원하려는 연구가 지속적으로 이루어져왔다(Brey and Mackensen, 1997; Kirby *et al.*, 1998; Andrus and Crowe, 2000; Davis, 2001; Schöne, *et al.*, 2004; Watanabe, *et al.*, 2004; Carré, *et al.*, 2005; Stephens, *et al.*, 2008; Elliot *et al.*, 2009; Ford, *et al.*, 2010). 산소와 탄소 동위원소 분석은 고기후를 복원하는데 아주 효과적인 방법으로써 특히 산소 동위원소는 표층해수의 온도(Epstein *et al.*, 1951, 1953; Shackleton *et al.*, 1973;

Killingley, 1980; Carroll *et al.*, 2009; Miyaji *et al.*, 2010), 해수의 염도 변화(Klein *et al.*, 1996, 1997)에 따라 변화를 보인다. 또한 탄소 동위원소는 해안의 용승현상(upwelling)이나 해양생물의 1차생산성(productivity)등에 따라 해수에 녹아있는 탄소 동위원소의 비가 달라진다(Killingley and Berger, 1979).

우리나라는 신석기 시대 이후로 형성된 패총들이 여러 지역에 분포하고 있으며, 패총에서 채취한 패각뿐만 아니라 화석과 현생패각을 이용한 고기후·고환경 복원연구가 이루어지고 있다(우경식, 1994; 안덕임과 이인성, 1996, 2001; 안덕임, 1997; 이인성 외, 1998; 김진경, 2002). 하지만 아직 패각의 종에 따른 환경반영정도에 대한 기초자료가 부족하며 고해상도 분석이 미흡한 실정이다. 따라서 이 연구는 제주도 상모리패총에서 발견되는 이매패류를 중심으로 패각에 기록된 산소와 탄소 동위원소를 통해 당시의 해양환경 및 기후변화를 알아보는 데에 그 목적이 있다.

2. 연구지역 및 연구방법

2.1. 연구지역

제주도 최남단에 위치하는 상모리패총(33° 12' 42.1" 126° 17' 45.4")은 송악산 북쪽에 위치하며, 남제주군 대정읍 상모리 산이수동 마을 해안에 형성되어 있다(Fig. 1). 1985년 처음 발견되어 1988년에 제주대학교박물관 주관으로 발굴되었다. 상모리패총 유적은 생활 주거지인 남쪽의 평탄한 유물 산포지·퇴적층 구역과, 패총구역인 사구층 지역으로 나눌 수 있다. 발굴은 각 구역별로 A지구(남쪽의 평탄한 유물산포지 및 퇴적층), B지구(북쪽의 사구 내륙 쪽으로 형성된 평평한 유물산포지), C지구(사구층), D지구(패각층)로 나누어 이루어졌다. D지구 패각층의 두께는 1 m 가 채 되지 않

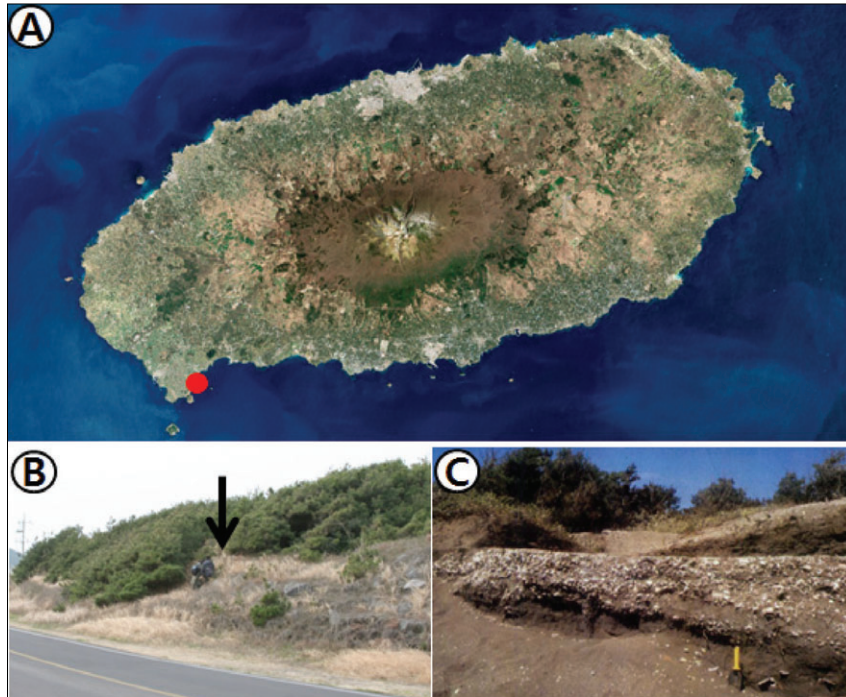


Fig. 1. Location of the study area. (A) A Satellite image of Jeju Island showing the study area. (B) Sampling site of Sangmori Shell Mound in 2009(arrow). (C) Sampling site of Sangmori Shell Mound in 1988 (From the Museum of Jeju National University, 1990).

는 얇은 층으로 형성되어 있지만 남북으로 20~30 m 정도 길게 연장되어 나타나며, 패각층 상부는 사구 층으로 덮여있다. 상모리패총의 고고학적 연대는 토기형태 및 유적지의 특징 등을 미루어 보아 약 2300 yr B.P. 로 추정되고 있다(제주대학교박물관, 1990).

2.2 연구방법

이번 연구를 위해 채취된 패류는 D지구에서 채취한 것으로서, 이 지역에서는 복족류(소라, 전복) 및 이매패류(조개, 굴)가 주로 발견되었다. 패총이 위치한 지역은 현재 식생이 발달되어 있어 단면을 약 50 cm 절개한 후 패각을 채취하였다. 채취된 패각 중 가장 손실이 적은 개체인 조개패각(밤색무늬조개과 투박조개, *Glycymeris albolineata*)을 선택하여 부드러운 솔로 깨끗이 물 세척 한 후 초

음파세척기로 이물질을 깨끗이 제거하고 24시간 자연건조 하였다. 투박조개는 원형도가 좋아 가장 빠르게 자라는 중심축이 중앙에 위치한다. 따라서 가운데 부분은 안정동위원소 분석을 위해 남겨두고 가장자리 부분을 통해 조직을 관찰하게 위해 박편을 제작하였다. 박편의 시편은 시료의 중앙에서부터 왼쪽 부분을 성장선을 관찰 할 수 있도록 각 정에서부터 장축으로 절단하였다. 잘린 패각은 박편제작 시 깨짐 방지를 위해 에폭시(epoxy)로 굳힌 후 연마편으로 제작하였다. 그리고 정확하고 미세한 패각구조를 알아보기 위해 주사전자현미경(SEM, scanning electron microscope)으로 패각의 단면을 관찰하였고, 패각을 구성하는 광물 성분을 알아보기 위해 시료의 오른쪽 가장자리를 약 200 mg 정도 분쇄하여 X-선 회절분석을 실시하였다.

안정동위원소분석을 위한 시료는 성장률이 가장 높은 부분을 분석하기 위해 중앙의 최대성장축을 중심으로 성장선을 따라 채취하였다. 간격은 약 0.5 cm 로 유지 하였으며 가장자리(ventral margin)에서부터 각정(umbo) 쪽으로 총 28개의 미 시료를 미량표품채취기(dental drill)를 이용하여 각각 300~400 μg 채취하였다. 이때 유년기 성장을 보이는 각정 부분은 제외하였다. 채취된 미 시료는 350°C에서 1시간 정도 가열하여 유기물을 제거하였으며, 분석은 독일의 Leibniz-laboratory에서 질량분석기(Mass spectrometer; Finnigan MAT 251)로 분석하였다. 산소와 탄소 동위원소의 분석 오차범위는 각각 $\pm 0.07\%$, $\pm 0.04\%$ 이며, 표기는 PDB를 표준시료로 한 ‰단위이다.

3. 연구결과

밤색무늬조개과 투박조개는 수심 5~20 m 깊이의 가는 모래밭에 사는 종으로 각정부가 타원형으로 약간 길다. 매우 두껍고 딱딱하며 교치는 빗 모양으로 한쪽에 15~17개가 있는 것이 특징이다. 옷감무늬의 껍질을 가지며 황갈색의 각피로 덮여있다. 평균적으로 각고(height) 7 cm, 각장(length) 8cm 정도의 크기를 보이며 일본, 우리나라의 동해안에 분포한다(권오길 외, 1993). 이번 연구에 사용된 시료(JSM-B01)는 각고 8.5 cm, 각정 9 cm 정도의 크기를 보인다. 뚜렷한 연성장선을 보이고 있으며, 특히 추운겨울 성장이 잠깐 멈춘 시기를 지시하는 성장선이 총 4차례 걸쳐 뚜렷하게 관찰된다(Fig. 2a). 이때 성장선의 간격은 유년기에서 노년기로 갈수록 그 폭이 좁아지며 세 번째와 네 번째 성장선이 V자 모양의 틈을 보이며 가장 뚜렷

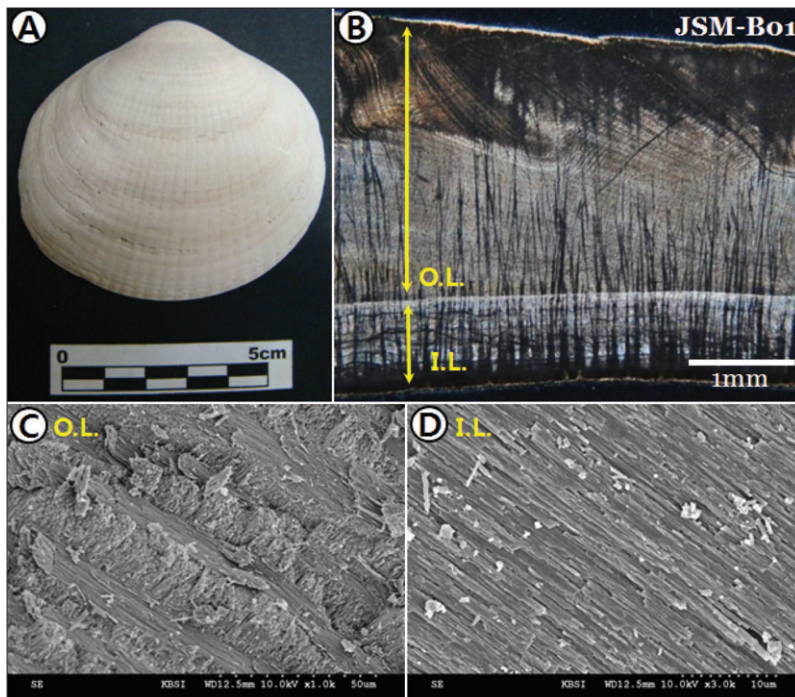


Fig. 2. (A) *Glycymeris albolineata*. (B) Microstructure of *G. albolineata* showing outer and inner layers (O.L. and I.L.). (C) Crossed-lamella ultrastructure of the outer layer under SEM. (D) Prismatic ultrastructure of the inner layer under SEM.

하게 관찰된다. 연 성장선 사이로도 좀 더 밀집된 희미한 성장선이 관찰되는데 이는 연 성장을 하는 동안 성장환경이 달라질 때마다 생기는 작은 성장선이라고 할 수 있다. 그 외에도 편광현미경하에서 관찰하면 미세한 성장선까지 관찰이 가능하다(Figs. 2a, 2b).

일반적으로 패각은 2~3개의 층으로 이루어지며 각 층마다 고유한 미세구조를 가지며 결정이 성장한다. 편광현미경하에서 관찰되는 패각(JSM-B01)은 2개의 층으로 구분되며, 특히 바깥층(outer layer)에서는 성장선이 잘 관찰된다. 층 내에는 유기물이 포함되어 있어 검은색을 띤다(Fig. 2b). X-선 회절 분석(XRD)결과 각질을 이루는 광물 성분은 아라곤나이트임을 알 수 있다(Fig. 3). 광물의 미세구조는 안쪽층(inner layer)이 주상(prismatic) 미세구조를, 바깥층이 사박층(crossed lamellar) 미세구조를 보인다(Figs. 2c, 2d).

산소와 탄소동위원소 성분 분석을 위해 패각의 최대성장축 가장자리에서부터 각정 방향으로 약 4.5 cm 정도 되는 부분을 28개 포인트로 분리하여 미시료를 채취하였다. 각고의 전체 길이가 8.5 cm 정도이지만 유년기 부분인 4 cm 가량을 제외한 나머지 4.5 cm 정도를 분석하였으므로 조개 성장의 장년기와 노년기에 해당하는 부분만을 분석하였다고 판단

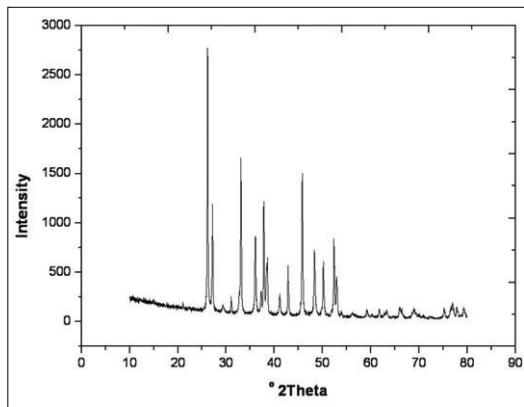


Fig. 3. X-ray diffraction data of the shell in this study, showing the aragonite peaks.

된다. 장년기와 노년기의 산소동위원소($\delta^{18}\text{O}$)와 탄소 동위원소($\delta^{13}\text{C}$) 값은 각각 $-3.7\sim-0.3\%$, $1.1\sim 2.2\%$ 분포를 보인다(Table 1). 전반적으로 두 개의 동위원소는 장년기에는 서로 비슷한 경향을 보여주지만 노년기로 가면서 오히려 반대의 경향을 보이고 있려 반대의동위원소는 4번의 뚜렷한 정점과 5번의 골 지점을 보이며 주기적으로 나타난다(Fig. 4). -2.의 판단된다. 첫 번째 정점을 제외한 나머지 3개의 정점은 노년기로 가면서 각각 -3.7% , -3.6% -3.의 판단된다며 비슷한 값판단나타내고 있려 반이러한 정점은 노년기로 갈수록 그 위

Table 1. Oxygen and carbon isotope values of *Glycymeris albolineata* from the Sangmori Shell Mound.

Sample No.	$\delta^{18}\text{O} \text{ ‰ (PDB)}$	$\delta^{13}\text{C} \text{ ‰ (PDB)}$
sm1	-1.1	1.2
sm2	-0.8	1.7
sm3	-1.7	1.4
sm4	-2.1	1.6
sm5	-2.4	1.5
sm6	-2.2	1.6
sm7	-1.9	1.8
sm8	-1.1	1.7
sm9	-0.3	2.2
sm10	-0.5	1.8
sm11	-1.0	1.7
sm12	-2.3	1.5
sm13	-3.7	1.4
sm14	-3.4	1.5
sm15	-2.4	1.4
sm16	-1.3	1.7
sm17	-2.3	1.5
sm18	-3.6	1.4
sm19	-2.5	1.5
sm20	-1.5	1.4
sm21	-3.3	1.4
sm22	-2.2	1.3
sm23	-2.1	1.4
sm24	-0.9	1.2
sm25	-0.9	1.3
sm26	-0.8	1.2
sm27	-0.5	1.1
sm28	-0.9	1.2

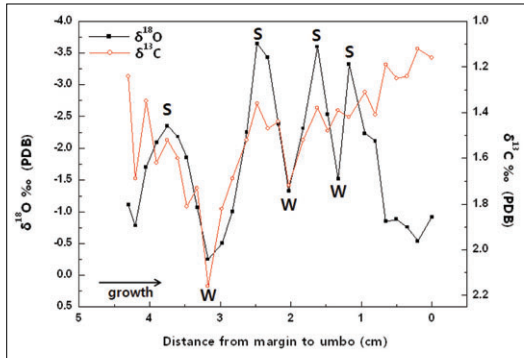


Fig. 4. Oxygen and carbon isotope compositions of *Glycymeris albolineata* showing seasonal variations. Coeval trends of both isotope compositions can be observed, heavier values during winters (W) and lighter values summers (S) except for their old growth stages.

원(넓이)가 줄어들며 4번째 정점반이후 약 1 cm 정도 구간에서는 뚜렷한 경향성을 보이지 않느라 반정점과 상반되는 골 와 노년층 5번 관찰되 지점, 고값판단된다. 2번째 골 지점이 -0.3‰을 보이므로 대의동위원소 값은 모두 0‰ 이하의 값판단된 인다고 할 수 있다. 조개의 끝와 차 길이가 8.5 cm 약 3.15 cm 떨어진 구간이 가장 낮은 값(-3.7‰)을 보이고, 2.5 cm 떨어진 구간에서 가장 높은 값(-0.3‰)을 보이는데, 반이 두 값의 차. 약 3.의 골다. 나머지 구간에서는 평균 2% 정도의 차이를 보이고 있으며, 노년기로 갈수록 이러한 차이 값이 줄어드는 차으로 관찰된다. 향을 보이고 있려경 평대의 보이고 만큼 뚜렷한 경향성을 보이지한 않지만, 장년기에서 대의동위원소와 비슷한 주기를 보이다가 노년기로 갈수록 점차 값이 낮아지한 경향을 보이며 최저 1.1% 까지 낮아진다. 탄소동위원소 역시 산소동위원소 값이 가장 높은 3.15cm 지점에서 2.2‰로 가장 높은 값을 보인다.

4. 토 의

4.1. 조직적 특징

밤색무늬조개과 투박조개는 수심 5~20 m 정도의 모래밭에서 서식한다. 따라서 지화학적으로 분석한 패각의 값은 환경변화에 매우 민감한 얇은 해수 환경을 지시한다고 할 수 있다. 천해의 해수는 여름과 겨울 수온 변화에 민감하며, 염분 및 영양염류, 1차생산성도 계절별로 많은 차이가 있다. 특히 연구지역은 몬순기후에 노출되어있는 지리적 위치 상 여름에 강수가 집중되고, 중국의 양자강 및 황하강에서부터 흘러오는 중국대륙연안수(CCW)의 유입을 많이 받는다. 따라서 이러한 여러 해양 환경변화가 패각의 지화학적 성분으로 기록되었을 것으로 기대할 수 있다. JSM-B01 패각은 변질 받지 않은 아라고나이트로 이루어져 있으므로 패각은 속성변질을 받지 않았으며, 패각의 성분은 서식당시의 환경을 반영한다고 할 수 있다.

투박조개의 패각은 2개의 층으로 이루어져 있으며, 안쪽층과 바깥층은 성장선이 잘 발달한 미세구조를 보인다(Fig. 2). 안쪽층은 아라고나이트로 이루어진 주상구조를 보이는데 이는 미세한 아라고나이트침상들이 구과상 배열을 이루며, 각직표면에 수직으로 광물이 성장한 구조이다. 하지만 바깥층의 사박층 미세구조는 1차 라멜(lamel)과 2차 라멜이 수직을 이루면서 성장하게 되고, 이때 주변의 환경변화에 따라 성장속도가 달라지면서 성장선이 형성된다. 성장선은 일반적으로 겨울철 성장속도가 느릴 때 유기물이 함께 농축되어 나타나는 선이라 할 수 있다. 하지만 이러한 성장선은 겨울에만 국한되어 나타는 것이 아니라 환경변화에 따라 성장하지 못할 때 나타나는 경우도 있다. 성장선은 크게 계절변화에 따라 여름의 활발한 성장과 겨울의 수온하강에 따른 성장 멈춤(growth band), 보름을 기준으로 조금(neap tide)일 때 활발한 성장과 사리(spring tide)일 때 성장률이 줄어드는 성

장 멈춤(growth check), 하루를 기준으로 밀물일 때 성장하고, 썰물일 때 성장이 멈추어 형성되는 성장선(growth line)으로 구분할 수 있다. 이 외에도 산란기 때 성장을 멈춰 성장선이 생기는 경우가 있으며, 폭풍과 같은 환경스트레스에 의해 일시적으로 성장이 멈추면서 갑자기 형성되기도 한다 (Jones, *et al.*, 1978; Thompson and Dreibelbis, 1980; Renee and Alexander, 2004; Hallmann, *et al.*, 2009; Miyaji *et al.*, 2010). 수온이 높은 지역에서는 여름에 온도가 너무 높아서 성장이 멈추는 경우도 보고되고 있다 (Carré *et al.*, 2005).

4.2. 투박조개의 안정동위원소

앞에서 살펴본 바와 같이 조개는 빠르게 성장하는 시기와 느리게 성장하거나 멈추는 시기가 있다. 패각이 서식환경을 기록한다고는 하지만 성장이 멈추는 시기에는 그 서식환경이 각질 내에 기록되지 않을 수가 있으므로, 각질에 대한 지화학적 분석 자료가 조개가 성장한 기간 동안의 주변 환경 변화를 모두 반영하기는 어려울 수도 있다. 또한 성장기간을 모두 반영한다고 해도 성장속도가 항상 일정하지 않을 수 있기 때문에 성장기간 동안 자란 각질을 모두 같은 간격으로 나누어 환경을 추정하기는 어렵다. 즉 성장이 활발한 여름은 넓게 성장하므로 등 간격으로 시료를 채취했을 경우 여름과 겨울의 해상도는 달라질 수 있다. 겨울에는 성장률이 낮아서 성장선이 조밀하므로 같은 크기의 포인트 분석을 했을 경우 여름보다 겨울 해상도가 떨어질 수 있다. 또한 추운 겨울에는 패각이 자라지 않을 수 있기 때문에 패각에 기록된 겨울 값은 실제로 겨울을 반영하는 것이 아닌 늦가을 또는 초봄에 성장한 기록을 나타낼 수도 있다. 이러한 해상도의 차이는 노년기로 가면서 성장속도가 점점 줄어들게 됨으로 노년기 해상도 역시 유년기 보다 낮아질 수 있다.

JSM-B01 패각의 안정동위원소 분석 결과, 그래프에서 몇 개의 주기적인 정점이 관찰되는데, 이는 조개 패각에서 볼 수 있는 일반적인 계절변화로써, 여름에는 낮은 값, 겨울에는 높은 값을 보인다. 정점은 노년기로 갈수록 좁은 범위를 보이는데 이는 성장률이 점 여낮아짐을 보여준다. 또한 마지막 노년기에서는 뚜렷한 주기를 보이지 않는다. 이러한 경향성은 조개의 종마다 달라질 수 있다. Stephens *et al.*(2008)는 현생조개와 패총에서 나오는 조개(*Geloina erosa*)를 달용하여 마지막에 기록된 산소 동위원소의 값을 통해 어느 계절에 조개가 채집되었는지를 밝힐 수 있다고 보고하였개의 종마다 투박조개는 마지막 성장에 기록된 값이 뚜렷한 주기를 보이지 않으므로 노년기에는 주변 환경을 잘 반영하지 않는 것으로 생각이 좀 그러나 보다 정확한 해석을 위해서는 실제 해수의 반영 정도에 대한 현생종의 분석 연구가 필요하다.

JSM-B01의 산소 동위원소 값은 $-3.7\sim-0.3\%$ 의 분포를 보인다(Fig. 4). 현재 해수의 평균 산소 동위원소 값이 0% 정도 값을 가진다고 가정하면, 이러한 값은 전반적으로 고갈된 성분이라고 볼 수 있다. 일반적으로 탄산염 각질을 침전시키는 생물체가 산소 동위원소를 반영할 때는 주변 해수 자체의 동위원소 성분 또는 해수 온도에 영향을 받게 된다. 해수자체의 동위원소는 빙하기-간빙기 등과 같이 해수자체의 동위원소 성분이 변하기도 하지만, 지역적으로 염분변화에 의해 일시적으로 변화가 있을 수도 있다. 아직 이 시료에 대한 정확한 연대측정이 이루어지지 않아 이 패각의 성장시기를 정확히 추정하기는 어려우나, 이 패각의 연령이 고고학적 연대인 2300 yr B.P. 에 가깝다면, 이때의 해수성분은 현재의 해수성분과 많은 차이가 없을 것으로 사료된다. 또한 제주도는 지형적인 특성상 하천이 발달하지 않아 많은 강수 유입이 없었을 것으로 생각된다. 하지만 제주도의 여름철 해수 염분은 일시적으로 낮아지는 현상이 나타난다. 김인옥

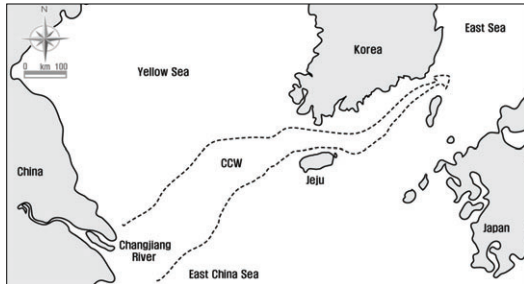


Fig. 5. Schematic path of CCW (China Coastal Water) in summer (After Kim and Rho, 1994).

과 노홍길(1994)은 제주근해의 주기적인 염분 모니터링을 통해 양자강과 황하강으로부터 유입되는 중국대륙연안수에 영향을 받는다고 보고하였다 (Fig. 5). 중국대륙연안수는 주로 양자강 하구로부터 흘러나와 제주해협을 거쳐 남해로 흘러가는 저염분수이다. 겨울철 제주도 주변해역의 염분범위가 32.2~34.8‰임을 고려했을 때, 여름철에 최저 28‰까지 낮은 염분수가 관측되는데 이를 중국대륙연안수의 영향이라고 보고하였다. 저염분수는 평균 6월말에서 10월초까지 제주 근해에 영향을 주는 것으로 나타났으며, 민물이 섞인 혼합수로서 밀도가 낮아 표층을 따라 이동하게 된다. 김인옥과 노홍길(1994)의 관측결과 최대 50 m 수심 까지 저염분수가 영향을 미치며 평균 25 m 정도의 수괴를 형성하는 것으로 보고하였다. Moon *et al.*(2009)은 실제 저염분수의 이동경로를 확인하기 위해 인공위성으로 추적할 수 있는 물체(particles)를 양자강 하구에 띄워 그 경로를 관측한 결과, 실제 양자강 하구에서부터 제주해협을 거쳐 남해를 지나가는 것으로 관측되었다. 국립수산과학원(NFRDI)에서는 매년 제주해역의 염분 및 수온을 모니터링하고 있으며 최근 20년간 관측 자료에 따르면 해수 온도는 평균 15~28°C분포를 보이며 염분은 29~34‰의 범위를 보이고 있다(Fig. 6). 이때 겨울의 염분과 수온은 매년 거의 일정한 값을 보이지만 여름 값은 많은 차이를 보인다. 특히 여름의 염분이 다른 해에 비해 적게 떨어지는 해에는 수온이

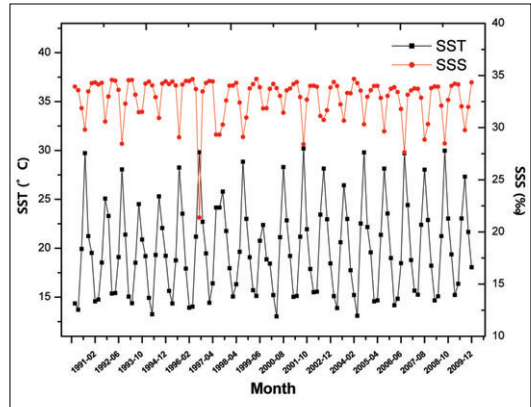


Fig. 6. Sea surface temperature (SST) and sea surface salinity (SSS) variations of the seawater near Jeju Island for the past 20 years. Note the constants salinity data for winter seasons, but variable data for summer seasons (From the data by National Fisheries Research & Development Institute).

다른 해에 비해 낮은 경향성을 보인다. 이는 따뜻하고 저염분인 중국대륙연안수의 유입이 적어 상대적으로 염분이 높고 온도는 낮은 것으로 사료된다. 또한 지난 2010년 8월 13일 관측된 저염분수의 수직분포범위는 약 25m 정도로 평균 심도를 보였다. 이는 5~20m 모래밭에 서식하는 투박조개 생태에 영향을 미치는 범위이다. 따라서 해수보다 산소 동위원소 값이 낮은 민물의 영향을 받는 여름에는 패각의 산소 동위원소 값 역시 겨울보다 더 낮은 값을 기록하는 것으로 판단된다.

패각의 탄소동위원소 값은 1.1~2.2‰의 분포를 나타내지만, 산소동위원소에 비해 뚜렷한 계절적 주기를 보이지는 않는다(Fig. 4). 전반적으로 중년기에는 산소동위원소와 비슷한 경향을 보이다가 노년기로 갈수록 점점 고갈된 값을 보여주고 있다. 탄소동위원소는 산소동위원소와는 다르게 해수온도에 영향을 받지 않고, 크게 서식당시 해수의 무기탄소량(DIC; dissolved inorganic carbon) 또는 생물체 자체의 신진대사(metabolism)에 영향을 받는다. 일반적인 경우, 1차적으로 DIC의 영향을 받고 2차적으로 신진대사영향을 받는다고 알려져 있다(Brey and Mackensen, 1997). DIC는 1

차 생산성과 관련이 있는데, 식물성플랑크톤이 번성하게 되면 광합성이 활발하여 해수에 녹아있는 ^{12}C 의 소모가 ^{13}C 보다 활발하므로 해수는 상대적으로 탄소 동위원소 값이 부화되는 경향을 보인다. 조개는 부화된 탄소 동위원소 값을 반영하게 되므로 패각에도 부화된 값을 기록하게 되는 것이다. 결과적으로 DIC는 식물성 플랑크톤, 즉 엽록소의 생산량과 관계가 있다. 이 외에도 민물이 유입된다거나, 용승현상(upwelling)에 의해 심해수가 표층으로 올라오에 따라 DIC가 영향을 받을 수 있다 (Killingley and Berger, 1979; Bemis and Geary, 1996). 이는 이미 해수와 다른 DIC함량을 가지는 물이 유입됨으로 인해 서식환경의 DIC 함량이 달라지기 때문이다. JSM-B01의 탄소 동위원소 값은 산소 동위원소 값과 마찬가지로 여름에 중국대륙연안수의 영향을 받을 것이다. 민물의 탄소 동위원소 값은 해수보다 낮은 값을 가지므로 연구시료에서 보여주는 여름의 낮은 값과 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 저염분의 민물은 식물성플랑크톤의 활동을 방해 할 것이며, 실제 제주 근해의 엽록소a 분포도를 살펴보면 여름보다 늦가을이나 초봄에 훨씬 많이 관측된다. 따라서 겨울에는 저염분수의 영향을 받지 않고 반대로 엽록소a의 1차생산성에 영향을 많이 받을 것이므로 겨울의 높은 값을 나타내는 것으로 사료된다. 하지만 산소 동위원소 보다 주기적이지 못한 것에 대한 해석은 현재의 자료로는 아직 미흡한 실정이다. 또한 투박조개가 기록한 탄소 동위원소 값이 얼마나 신진대사에 영향을 받는지에 대한 정보가 부족하고, 주변해수의 반영정도에 대한 문제도 남아있으므로 정확한 해석을 하기에는 무리가 따른다. 따라서 정확한 해석을 위해서는 투박조개의 생태와 신진대사가 미치는 정도까지 파악을 해야만 해석의 오차를 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

상모리패총에서 발견된 패각은 밤색무늬조개과 투박조개로서 당시 생활하던 인류에 의해 식료품을 채취되었을 것이다. 이 패각은 아라고나이트광물로 이루어져있는데, 이는 속성작용에 의해 변질받지 않았다는 것을 의미한다. 따라서 패각의 지화학적 분석을 통해 패각에 기록되어 있는 고환경 연구가 가능하다. 성장선이 잘 나타나는 바깥층은 연 성장을 나타내는 굵고 깊은 성장선이 4개정도 나타나며, 성장선간의 간격은 점점 좁아지는 양상을 보여 유년기에서 노년기로 갈수록 성장속도가 줄어드는 경향을 보인다. 패각에 기록되어 있는 산소 동위원소 값은 서식당시 주변해수의 염도와 온도를 반영하는 것으로 보이며 특히 여름(6월 말~10월 초)에 집중되는 저염분수인 중국대륙연안수의 영향을 크게 받는 것으로 사료된다. 이러한 해수의 계절적 변화는 패각 내에 주기적인 정점을 기록함으로써 여름과 겨울의 계절변화를 나타내는 것으로 판단된다. 계절주기 역시 노년기로 갈수록 정점의 범위가 줄어들어서 성장률이 감소했음을 알 수 있다. 하지만 채집될 당시의 값은 뚜렷한 주기를 보여주지 않으므로 투박조개는 노년기에 주변환경을 잘 반영하지 못하는 것으로 사료된다. 탄소 동위원소 값은 중반기에 산소 동위원소와 비슷한 경향을 보이다가 노년기로 갈수록 반복적인 주기를 보이기보다는 전반적으로 고갈된 값을 보이고 있다. 뚜렷한 주기를 보이는 중년기의 탄소 동위원소 값은 초겨울에 부화된 값을, 여름에 고갈된 값을 갖는데, 이는 낮은 탄소 동위원소 값을 가지는 여름의 저염분수에 의해 영향을 받는 것으로 보이며, 겨울에 기록된 값은 제주근해의 1차생산성에 영향을 받는 것으로 보인다.

사 사

논문을 심사해주신 심사위원님께 감사드리며, 시료채취에 도움을 주신 제주고고학연구소의 김종찬 연구원님과 극지연구소 지효선씨에게 감사한다. 이 연구는 2009~2010년 한국지질자원연구원의 '가속기질량분석기 구축사업' 일환으로 이루어졌다.

참고문헌

- 권오길, 박갑만, 이준상, 1993, 원색한국패류도감, 아카데미서적, 서울, 445p.
- 김인옥, 노홍길, 1994, 제주도 주변해역에 출현하는 중국대륙연안수에 관한 연구, 한국수산학회지, 27, 515-528.
- 김진경, 2002, 제주도 서귀포층 화석의 산소와 탄소 동위원소, 미량원소 성분을 이용한 고해양환경 변화에 대한 연구, 강원대학교 석사학위논문, 104p.
- 스즈키 기미오, 1989, 패충의 고고학, 일조각, 서울, 199p.
- 안덕임, 1997, 산소 동위원소법을 이용한 선사시대 조개채집의 계절성 결정에 관한 연구, 선사와 고대, 8, 47-54.
- 안덕임, 이인성, 1996, 산소 동위원소 분석을 이용한 계절성 연구, 한국패류학회지, 12, 105-108.
- 안덕임, 이인성, 2001, 산소 동위원소분석을 이용한 대죽리패충 조개채집의 계절성 연구, 한국신석기연구회지, 2, 5-11.
- 우경식, 1994, 패류화석을 이용한 고환경 복원, 한국패류학회지, 10, 10-23.
- 이인성, 안덕임, 이광식, 황 정, 1998, 선사시대 패류채집의 계절성연구에 대한 탄소 동위원소법의 적용, 한국상고사학회지, 29, 179-185.
- 제주대학교박물관, 1990, 상모리패충, 제주, 325p.
- Andrus, C.F.T. and Crowe, D.E., 2000, Geochemical analysis of *Crassostrea virginica* as a method to determine season of capture, Archaeological Science, 27, 33-42.
- Arthur, M.A., Williams, D.F. and Jones, D.S., 1983, Seasonal temperature-salinity changes and thermocline development in the mid-Atlantic Bight as recorded by the isotopic composition of bivalves, Geology, 11, 655-659.
- Beck, J.W., Edwards, R.L., Ito, E., Taylor, F.W., Recy, J., Rougerie, F., Joannot, P. and Henin, C., 1992, Sea surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios, Science, 257, 644-647.
- Bemis, B.E. and Geary, D.H., 1996, The usefulness of bivalve stable isotope profiles as environmental indicators: Data from the eastern Pacific Ocean and the southern Caribbean Sea, PALAIOS, 11, 328-339.
- Bradley, R.S., 1999, Paleoclimatology: Reconstructing climates of the Quaternary, 2nd Ed., 613p.
- Brey, T. and Mackensen, A., 1997, Stable isotopes prove shell growth bands in the Antarctic bivalve *Laternula elliptica* to be formed annually, Polar Biology, 17, 465-468.
- Carré, M., Bentaleb, I., Blamart, D., Ogle, N., Cardenas, F., Zevallos, S., Kalin, R.M., Ortlieb, L. and Fontugne, M., 2005, Stable isotopes and sclerochronology of the

- bivalve *Mesodesma donacium*: Potential application to Peruvian paleoceanographic reconstructions, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 228, 4-25.
- Carroll, M.L., Johnson, B.J., Henkes, G.A., McMahon, K.W., Voronkov, A., Ambrose Jr., W.G. and Denisenko, S.G., 2009, Bivalves as indicators of environmental variation and potential anthropogenic impacts in the southern Barents Sea, *Marine Pollution Bulletin*, 59, 193-206.
- Davis, L.G., 2001, A late Pleistocene to Holocene record of precipitation reflected in *Margaritifera falcata* shell $\delta^{18}\text{O}$ from three archaeological sites in the lower salmon river canyon, Idaho, *Archaeological Science*, 28, 291-303.
- Duplessy, J.-C., Lalou, C. and Vinot, A.C., 1970, Differential isotopic fractionation in benthic foraminifera and paleotemperatures re-assessed, *Science*, 168, 250-251.
- Elliot, M., Welsh, K., Chilcott, C., McCulloch, M., Chappell, J. and Ayling, B., 2009, Profiles of trace elements and stable isotopes derived from giant long-lived *Tridacna gigas* bivalves: Potential applications in paleoclimate studies, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 280, 132-142.
- Epstein, S., Buchsbaum, R., Lwenstam, H.A. and Urey, H.C., 1951, Carbonate-water isotope temperature scale, *Bulletin of Geological Society of America*, 62, 417-426.
- Epstein, S., Buchsbaum, R., Lwenstam, H.A. and Urey, H.C., 1953, Revised carbonate-water isotopic temperature scale, *Bulletin of Geological Society of America*, 64, 1315-1326.
- Ford, H.L., Schellenberg, S.A., Becker, B.J., Deutschman, H.L., Dyck K.A. and Koch, P.L., 2010, Evaluating the skeletal chemistry of *Mytilus californianus* as a temperature proxy: Effects of microenvironment and ontogeny, *Paleoceanography*, 25, PA1203.
- Gagnon, A.C., Adkins, J.F., Fernandez, D.P. and Robinson, L.F., 2007, Sr/Ca and Mg/Ca vital effects correlated with skeletal architecture in a scleractinian deep-sea coral and the role of Rayleigh fractionation, *Earth and Planetary Science Letters*, 261, 280-295.
- Hallmann, N., Burchell, M., Schöne, B.R., Irvine, G.V. and Maxwell, D., 2009, High-resolution sclerochronological analysis of the bivalve mollusk *Saxidomus gigantea* from Alaska and British Columbia: techniques for revealing environmental archives and archaeological seasonality, *Journal of Archaeological Science*, 36, 2353-2364.
- Jo, K.-N., Woo, K.S., Cheng, H., Edwards, L.R., Wang, Y., Kim, R. and Jiang, X., 2010, Textural and carbon isotopic evidence of monsoonal changes recorded in a composite-type speleothem from Korea since MIS 5a, *Quaternary Research*, 74, 100-112.
- Jones, D.S., Thompson, I. and Ambrose, W., 1978, Age and growth rate determinations for the Atlantic surf clam *Spisula solidissima* (bivalvia: Mactracea), based on Internal growth lines in shell cross-sections, *Marine Biology*, 47, 63-70.

- Killingley, J.S. and Berger, W.H., 1979, Stable isotopes in a mollusk shell: Detection of upwelling events, *Science*, 205, 186-188.
- Killingley, J.S., 1980, Seasonality of mollusk collecting at Hubbs's midden site 1959: VI:28A, *Pacific Coast Archaeological society Quarterly*, 16, 19-23.
- Kirby, M.X., Soniat, T.M. and Spero, H.J., 1998, Stable isotope sclerochronology of Pleistocene and recent oyster shells (*Crassostrea virginica*), *PALAIOS*, research reports, 13, 560-569.
- Klein, R.T., Lohmann, K.C. and Kennedy, G.L., 1997, Elemental and isotopic proxies of paleotemperature and paleosalinity: Climate reconstruction of the marginal northeast Pacific ca.80ka, *Geology*, 25, 363-366.
- Klein, R.T., Lohmann, K.C. and Thayer, C.W., 1996, Bivalve skeletons record sea-surface temperature and $\delta^{18}\text{O}$ via Mg/Ca and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios, *Geology*, 24, 415-418.
- Lachniet, M.S., 2009, Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values, *Quaternary Science Reviews*, 28, 412-432.
- Miyaji, T., Tanabe, K., Matsushima, Y., Sato, S., Yokoyama Y. and Matsuzaki, H., 2010, Response of daily and annual shell growth patterns of the intertidal bivalve *Phacosoma japonicum* to Holocene coastal climate change in Japan, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, palaeoecology*, 286, 107-120.
- Moon, J-H., Pang, I-C. and Yoon, J-H., 2009, Response of the Changjiang diluted water around Jeju Island to external forcings: A modeling study of 2002 and 2006, *Continental Shelf Research*, 29, 1549-1564.
- Renee, K.T. and Alexander, van G., 2004, Mg/Ca, Sr/Ca, and stable isotopes in modern and Holocene *Protothaca staminea* shells from a northern California coastal 2004, *Mg/region, Geochemica et Cosmochimica Acta*, 68, 3845-3861.
- Schne, B.R., Oschmann, W., Tanabe, K., Dettman, D., Fiebig, J., Houk, S.D. and Kanie, Y., 2004, Holocene seasonal environmental trends at Tokyo Bay, Japan, reconstructed from bivalve mollusk shells-implications for changes in the East Asian monsoon and latitudinal shifts of the Polar Front, *Quaternary Science Reviews*, 23, 1137-1150.
- Shackleton, N.J., Wiseman, J.D.H. and Buckley, H.A., 1973, Non-equilibrium isotopic fractionation between sea-water and planktonic foraminiferal tests, *Nature*, 242, 177-179.
- Stephens, M., Matthey, D., Gilbertson, D.D. and Murray-Wallace, C.V., 2008, Shell-gathering from mangroves and the seasonality of the Southeast Asian monsoon using high-resolution stable isotopes analysis of the tropical estuarine bivalve (*Geloina erosa*) from the Great Cave of Niah, Sarawak: methods and reconnaissance of molluscs of early Holocene and modern times, *Journal of Archaeological Science*, 35, 2686-2697.
- Thompson, D.S.J. and Dreibeilbis, D., 1980, Annual internal growth banding and life history of the ocean Quahog *Arctica islandica* (Mollusca: Bivalvia), *Marine*

- Biology, 57, 25-34.
- Watanabe, T., Suzuki, A., Kawahata, H., Kan H. and Ogawa, S., 2004, A 60-year isotopic record from a mid-holocene fossil giant clam (*Tridacna gigas*) in the Ryukyu Islands: physiological and paleoclimatic implications, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 212, 343-354.
- Woodhead, J., Reisz, R., Fox, D., Drysdale, R., Hellstrom, J., Maas, R., Cheng, H. and Edwards, R.L., 2010, Speleothem climate records from deep time? Exploring the potential with an example from the Permian, *Geology*, 38, 455-458.
- <http://portal.nfrdi.re.kr>
- 투 고 일 10. 10. 21
심 사 일 10. 10. 25
심사완료일 10. 12. 02